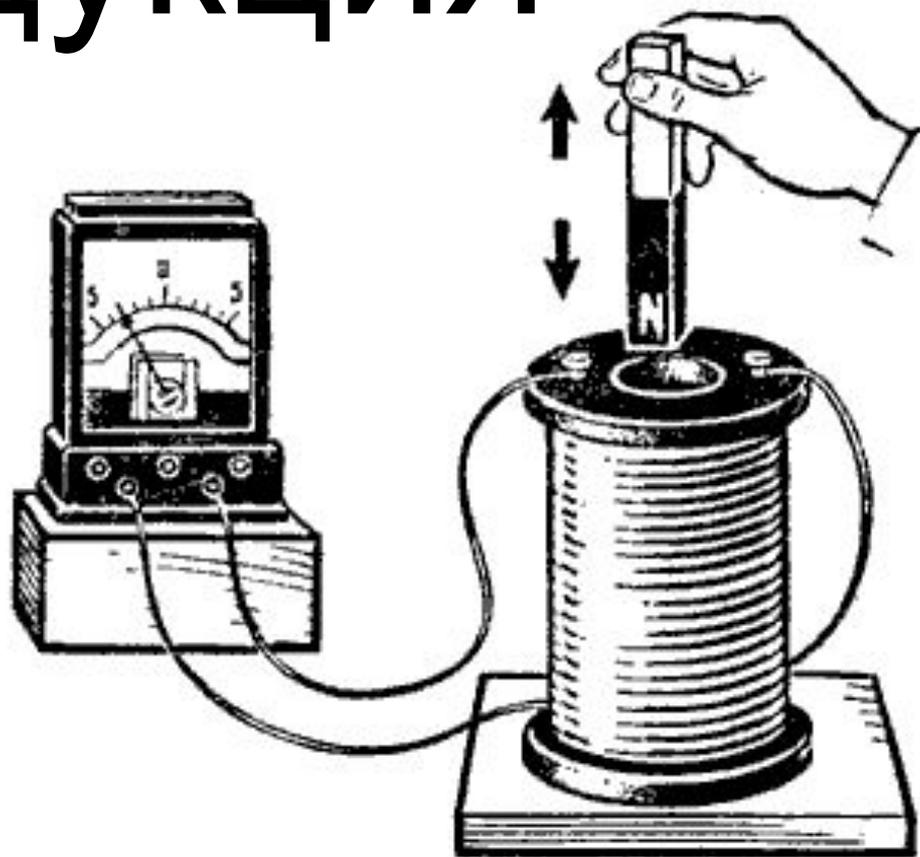


# Электромагнитная индукция



# 1. Поток вектора магнитной индукции

$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{S} = B_n \cdot dS$  - поток вектора магнитной индукции  $B$  через площадку  $dS$  (магнитный поток),

**Магнитный поток** – это скалярная физическая величина, равна скалярному произведению вектора магнитной индукции на вектор площади контура.

$B_n = B \cos \alpha$  - проекция вектора  $B$  на направление нормали к площадке  $dS$

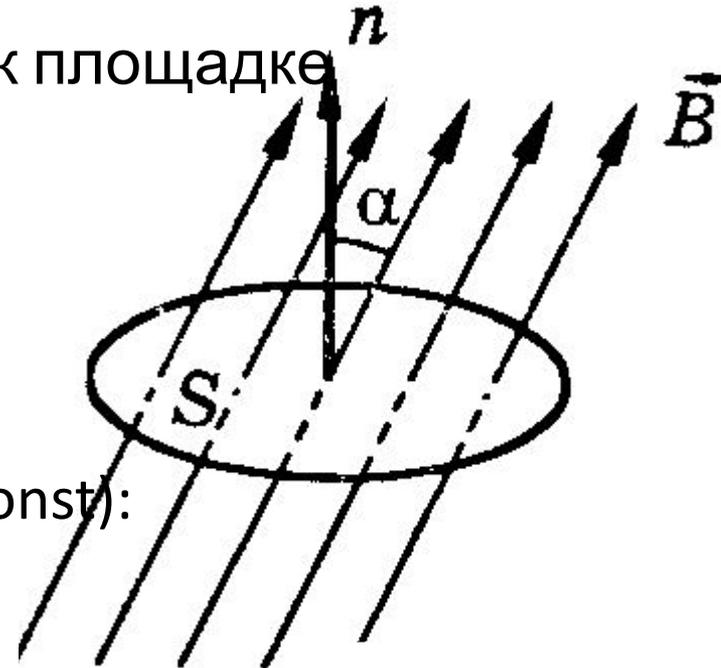
$\alpha$  – угол между вектором  $B$  и нормалью к площадке

Поток вектора магнитной индукции  $B$  через произвольную площадь  $S$ :

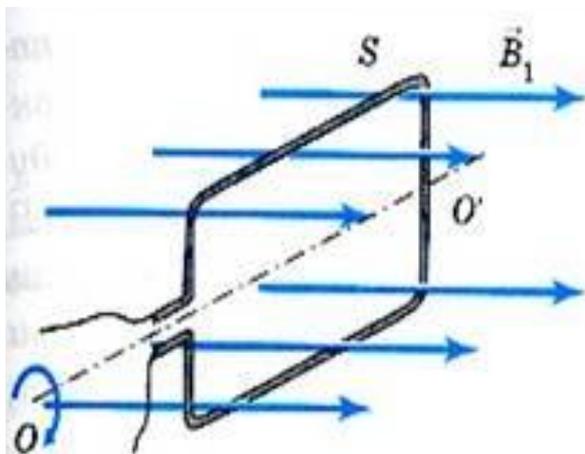
$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B_n \cdot dS$$

Если магнитное поле однородное ( $B = \text{const}$ ):

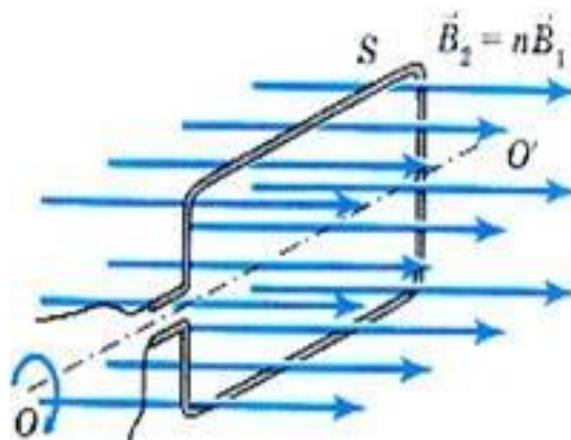
$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$



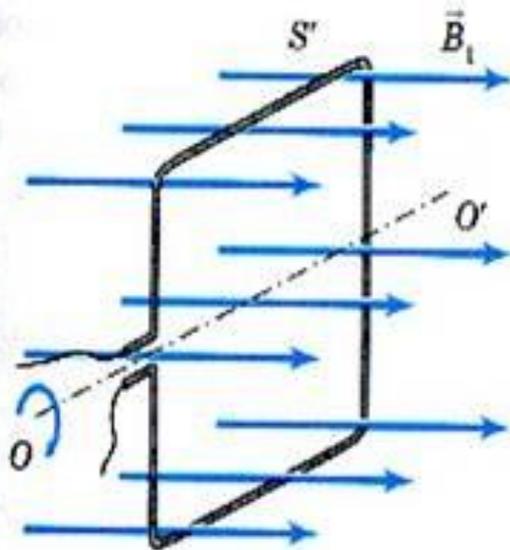
На каком рисунке поток вектора  $\vec{B}$  наибольший? Наименьший?



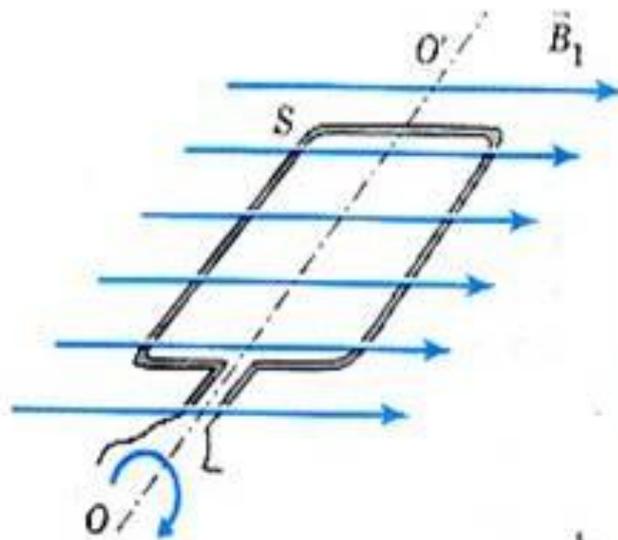
a)



б)



в)



г)

# Поток вектора В сквозь соленоид

Магнитный поток сквозь один виток соленоида площадью  $S$  (поле внутри соленоида однородное и сонаправлено с нормалью к контуру):

$$\Phi_1 = B \cdot S$$

Где  $B = \frac{\mu_0 IN}{l}$  - магнитная индукция внутри соленоида

Полный магнитный поток, сцепленный со всеми  $N$  витками соленоида, - **потокосцепление  $\Psi$** :

$$\psi = N \cdot \Phi_1 = N \cdot B \cdot S$$

$\Psi = \mu\mu_0 \frac{N^2 IS}{l}$  - полный магнитный поток вектора  $B$  сквозь соленоид

# 2. Явление электромагнитной

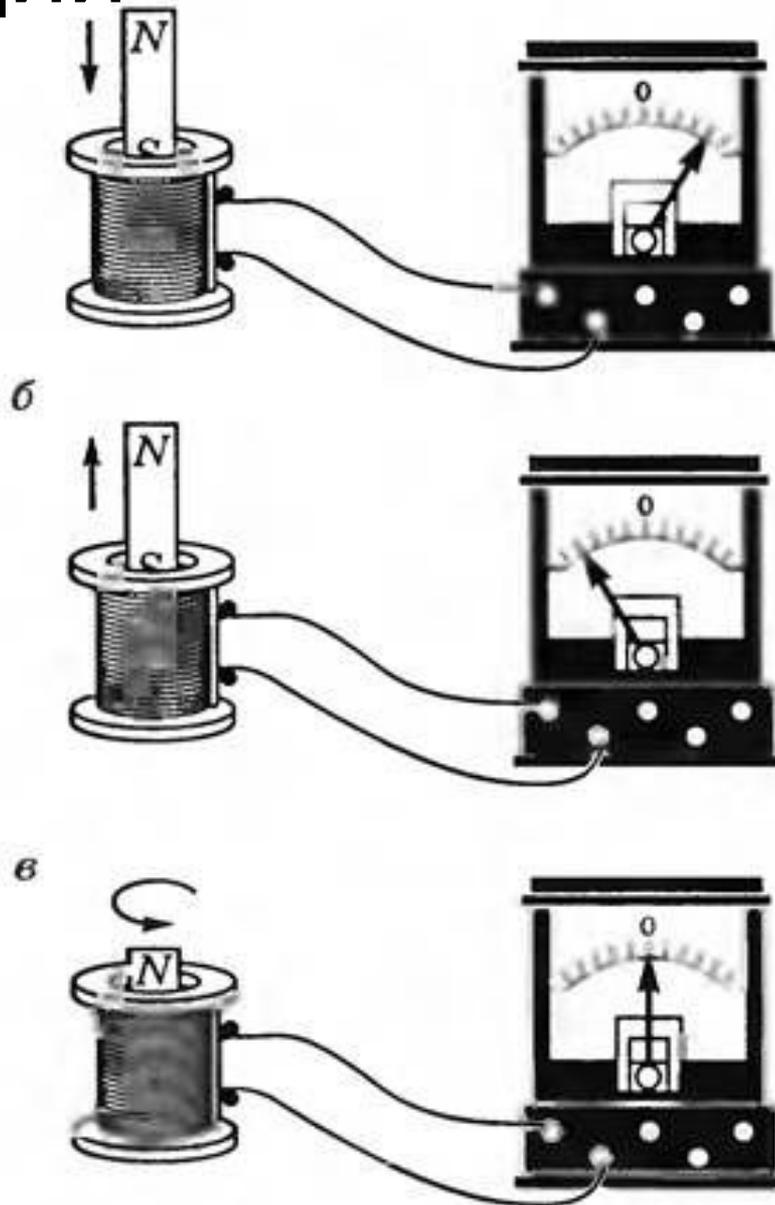
## ИНДУКЦИИ

Открыто М. Фарадеем в 1831 г.

В замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток, называемый **индукционным**.

Значение индукционного тока не зависит от способа изменения магнитного потока, а зависит от скорости его изменения.

***Фарадеем установлена связь между электрическими и магнитными явлениями.***



# Опыты Фарадея

**T21.1 ОПЫТЫ  
ФАРАДЕЯ**

# Закон Фарадея

$I_i$  - сила индукционного тока

Согласно закону Ома  $I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}$  где  $\varepsilon_i$  – ЭДС индукции, [В]  
 $R$  – сопротивление проводника

**Закон Фарадея:** ЭДС индукции, возникающая в замкнутом контуре, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока (независимо от причины его изменения).

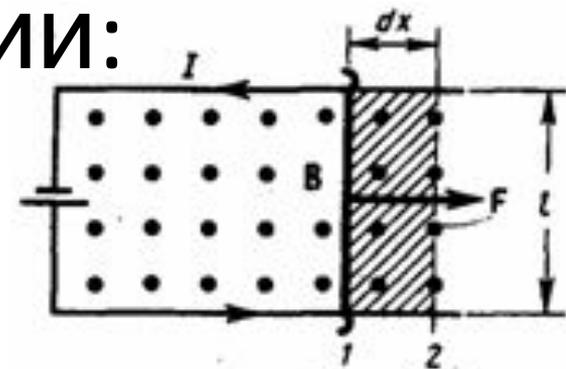
$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{- Закон Фарадея}$$

$\frac{d\Phi}{dt}$  - скорость изменения магнитного потока

Знак «-» показывает, что при увеличении магнитного потока ( $d\Phi/dt > 0$ ), поле индукционного тока направлено навстречу ему ( $\varepsilon_i < 0$ ).

# Вывод закона Фарадея из закона сохранения энергии:

Пусть проводник с током  $I$  помещен в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости контура и может свободно перемещаться. При этом сила Ампера совершает работу  $dA = I d\Phi$ .



Работа источника за время  $dt$  складывается из работы на джоулеву теплоту ( $I^2 R dt$ ) и работы перемещения проводника

$$(\varepsilon \cdot I) \cdot dt = I^2 \cdot R \cdot dt + I \cdot d\Phi$$

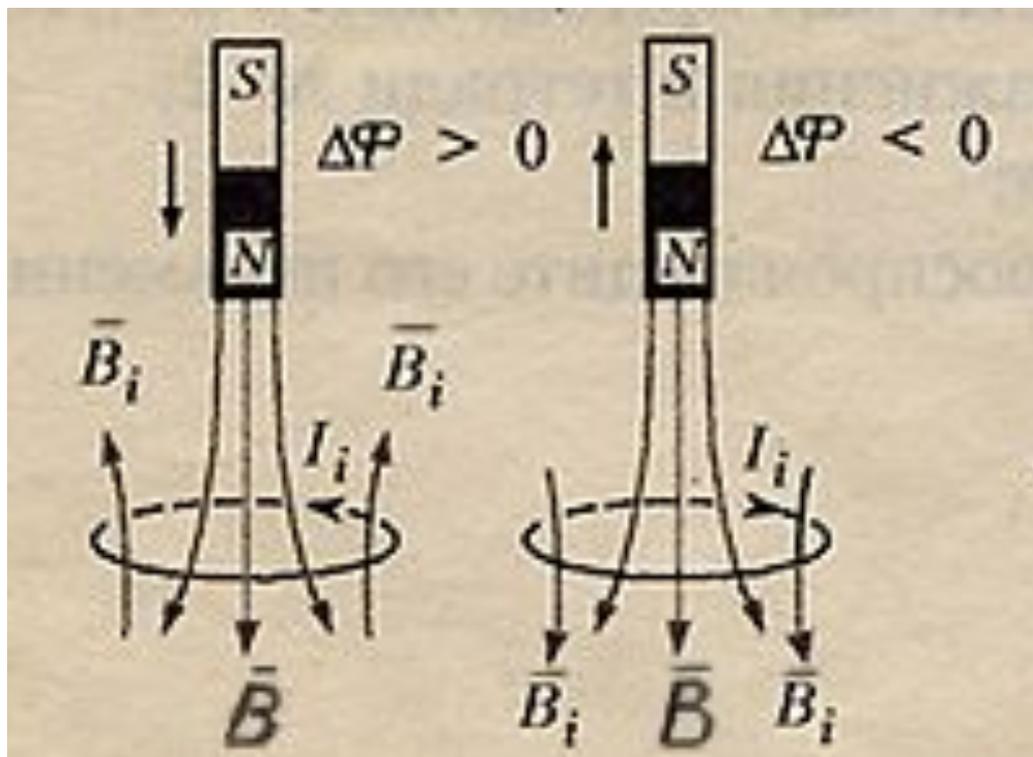
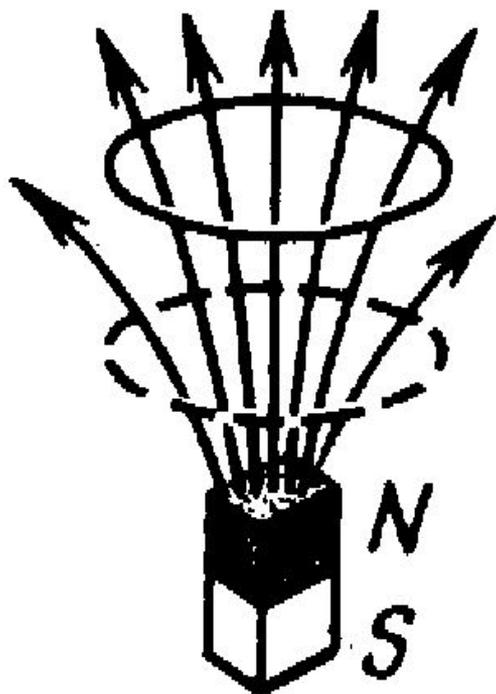
$$I = \frac{(\varepsilon - \frac{d\Phi}{dt})}{R}$$

Где  $\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$  - закон Фарадея

$\varepsilon$  – ЭДС источника тока,  
 $R$  – полное сопротивление контура,  
 $d\Phi$  – пересеченный проводником магнитный поток,  
 $I$  – сила тока

# Правило Ленца для нахождения направления индукционного тока:

Индукционный ток, возникающий при относительном движении проводящего контура и источника магнитного поля, всегда имеет такое направление, что его собственный магнитный поток компенсирует изменения внешнего магнитного потока, вызвавшего этот ток.



**T 21.4**

**ДВИЖЕНИЕ  
МЕТАЛЛИЧЕСКОГО  
КОЛЬЦА В ИЗМЕНЯ-  
ЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ  
ПОЛЕ**

**/ К ПРАВИЛУ ЛЕНЦА /**

**T 21.2**

**ОПЫТЫ  
С ТРАНСФОРМАТОРОМ  
ТОМСОНА**

# Алгоритм применения правила Ленца для нахождения направления индукционного тока:

- 1) Определить направление внешнего магнитного поля  $B$ ;
- 2) Определить увеличивается или уменьшается поток вектора  $B$  сквозь контур;
- 3) Если поток вектора  $B$  увеличивается, то направление магнитного поля индукционного тока  $B_i$  противоположно внешнему полю,  
Если поток вектора  $B$  уменьшается, то направление магнитного поля индукционного тока  $B_i$  сонаправлено с внешним полем;
- 4) Зная направление вектора  $B_i$ , определить направление индукционного тока по правилу буравчика (правой руки).

# Применение закона Фарадея

## А) ЭДС в рамке, вращающейся в магн. поле:

Пусть рамка площадью  $S$  вращается в однородном магнитном поле ( $B = \text{const}$ ) с постоянной угловой скоростью ( $\omega = \text{const}$ ).

Угол поворота рамки в момент времени  $t$ :  $\alpha = \omega \cdot t$  ( $\alpha_0 = 0$ )

Рамку пронизывает магнитный

$$\Phi_B = B_n \cdot S = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B \cdot S \cdot \cos \omega t$$

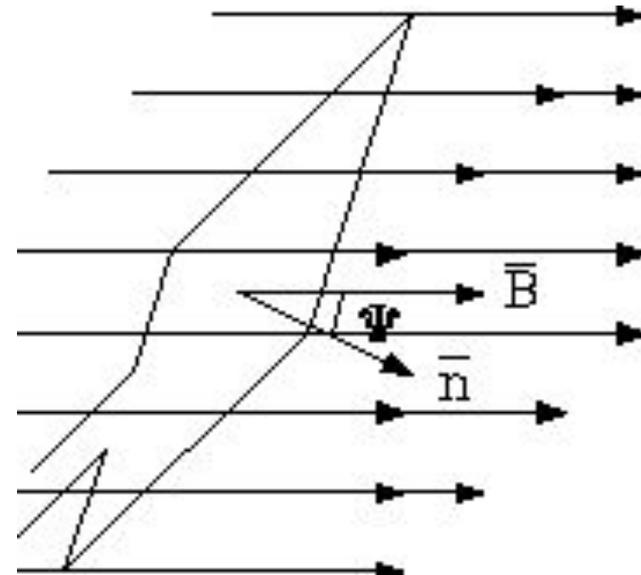
При вращении в рамке возникает ЭДС

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega t = \varepsilon_{\max} \sin \omega t$$

$$\varepsilon_{\max} = B \cdot S \cdot \omega$$

На этом принципе работают генераторы переменного тока.

Частота переменного тока, принятая в России  $\nu = \frac{\omega}{2\pi} = 50(\text{Гц})$



## Б) ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном

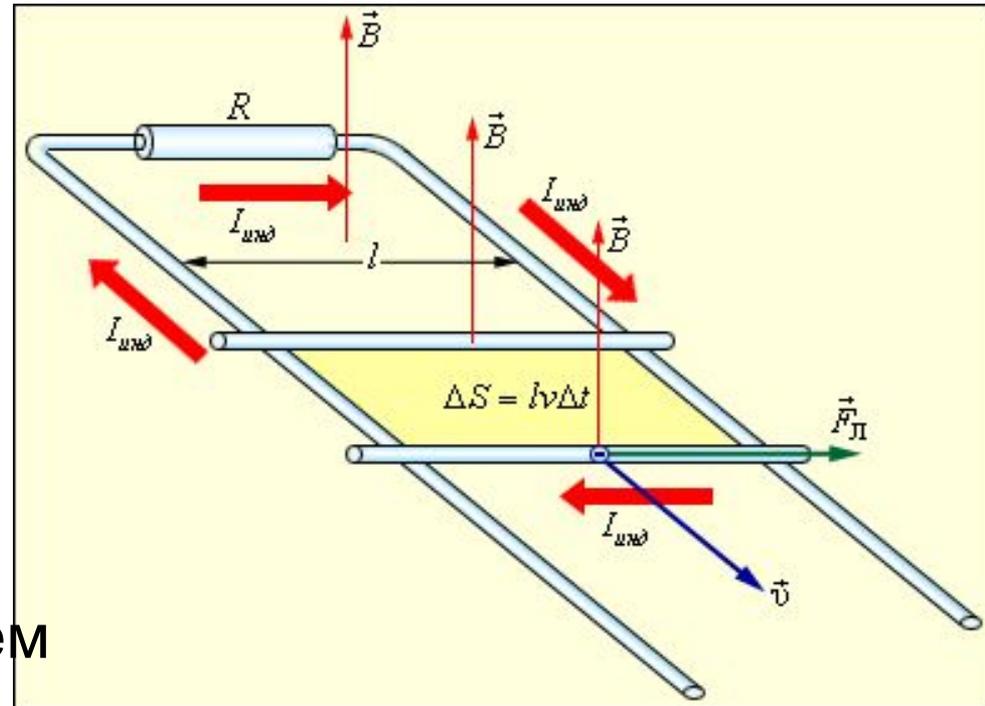
### поле:

При движении проводника со скоростью  $v$  за время  $dt$ , он проходит путь  $dx$  и охватывает площадь  $dS$ :

$$dS = l \cdot dx = l \cdot v \cdot dt$$

При движении проводника в нем возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{B \cdot dS \cdot \cos \alpha}{dt} = \frac{B \cdot l \cdot v \cdot dt \cdot \cos \alpha}{dt} = B \cdot l \cdot v \cdot \cos \alpha$$



## **В) вихревые токи (токи Фуко) в массивных проводниках:**

**Токи Фуко** — это вихревые замкнутые электрические токи в массивном проводнике, которые возникают при изменении пронизывающего его магнитного потока.

Вихревые токи являются индукционными токами и образуются в проводящем теле либо при изменении во времени магнитного поля, в котором находится тело, либо при движении тела в магнитном поле, которое приводит к изменению магнитного потока через тело или какую-либо его часть.

Величина токов Фуко тем больше, чем быстрее меняется магнитный поток.

### Проявление токов Фуко:

- Торможение движущихся проводников в магнитном поле;
- Нагревание проводников, движущихся в магнитном поле;
- Неравномерное распределение переменного тока по сечению толстого проводника, «вытеснение» быстропеременного тока на поверхность проводника (скин-эффект).

**T 21.9**

**" ПАРЯЩИЙ " ДИСК**

**T 21.8**

**МОДЕЛЬ**

**АСИНХРОННОГО**

**ДВИГАТЕЛЯ**

# 3. ИНДУКТИВНОСТЬ

Магнитный поток, сцепленный с контуром, пропорционален силе тока в контуре:  $\Phi = L \cdot I$

$L$  – коэффициент пропорциональности между  $\Phi$  и  $I$  (коэффиц. самоиндукции)  
– индуктивность, [Гн]

**Индуктивность зависит от:**

- геометрических свойств контура (формы, размеров);
- магнитных свойств среды, в которой он находится.

Очень большой индуктивностью обладают соленоиды с сердечниками из магнитных материалов.

**Индуктивность соленоида зависит от:**

- длины соленоида  $L$ ;
- площади сечения соленоида  $S$ ;
- числа витков  $N$ ;
- магнитной проницаемости сердечника  $\mu$ .

Индуктивность  
соленоида

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l}$$

# Индуктивность соленоида

Т 22.1

**ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ  
НА ИНДУКТИВНОСТЬ  
СОЛЕНОИДА**

**Физический смысл индуктивности:** мера инертных свойств проводника (аналог массы в механике).

Чем больше индуктивность, тем сложнее изменить силу тока в проводнике.



- условное обозначение проводников, обладающих индуктивностью



# 4. Явление самоиндукции.

**Самоиндукция** – это явление возникновения ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока.

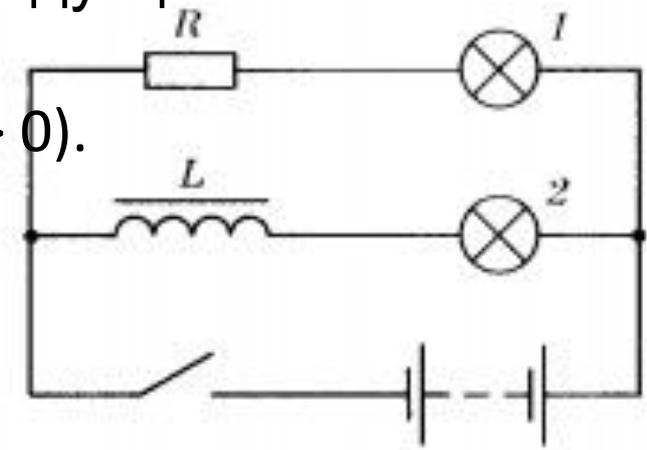
$\varepsilon_{si}$  – ЭДС самоиндукции, [В]

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \Phi = L \cdot I \quad \longrightarrow \quad \varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}$$

Если  $\frac{dI}{dt} > 0$  - ток нарастает, то ЭДС самоиндукции препятствует

резкому нарастанию тока ( $\varepsilon < 0$ ):  
Если  $\frac{dI}{dt} < 0$  - ток убывает, то ЭДС самоиндукции препятствует

резкому убыванию тока ( $\varepsilon > 0$ ).



**T 22.3**

**НАРАСТАНИЕ ТОКА  
В ЦЕПИ С БОЛЬШОЙ  
ИНДУКТИВНОСТЬЮ**

# 5. Токи при замыкании и размыкании цепи

Индукционные токи препятствуют мгновенному возникновению или исчезновению тока в цепи.

**А) при размыкании цепи:**  $I_0 = \frac{\varepsilon}{R}$  - начальное значение тока

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt} \quad \varepsilon_{si} = IR \quad \longrightarrow \quad IR = -L \frac{dI}{dt}$$

$$-\frac{R}{L} dt = \frac{dI}{I} \quad \longrightarrow \quad -\frac{R}{L} \int_0^t dt = \int_{I_0}^I \frac{dI}{I} \quad \longrightarrow \quad -\frac{R}{L} t = \ln \frac{I}{I_0}$$

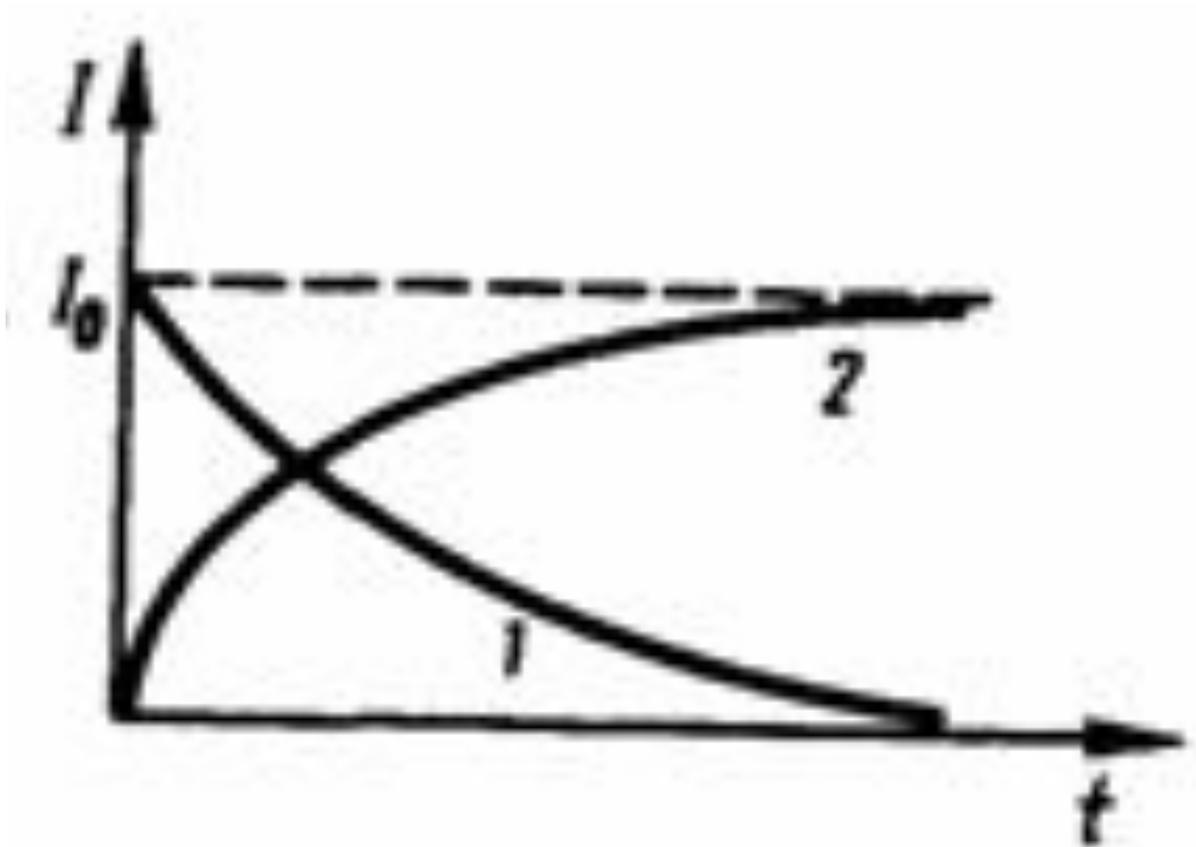
$$I = I_0 \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \quad \text{- при размыкании ток в цепи убывает экспоненциально}$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad \text{- время релаксации, [с] – время, в течение которого сила тока уменьшается в e раз}$$

**Б) при замыкании цепи:**  $I = 0$  - начальное значение тока

$I_0 = \frac{\varepsilon}{R}$  - установившееся значение тока при времени  $t \rightarrow \infty$

$I = I_0[1 - \exp(-\frac{R}{L}t)]$  - при замыкании ток в цепи возрастает экспоненциально



**T 22.2**

**ТОКИ  
ПРИ ЗАМЫКАНИИ  
И РАЗМЫКАНИИ  
ЦЕПИ**

# 6. Взаимная индукция

**Взаимная индукция** - это явление возникновения ЭДС индукции в одном из контуров при изменении силы тока в другом.

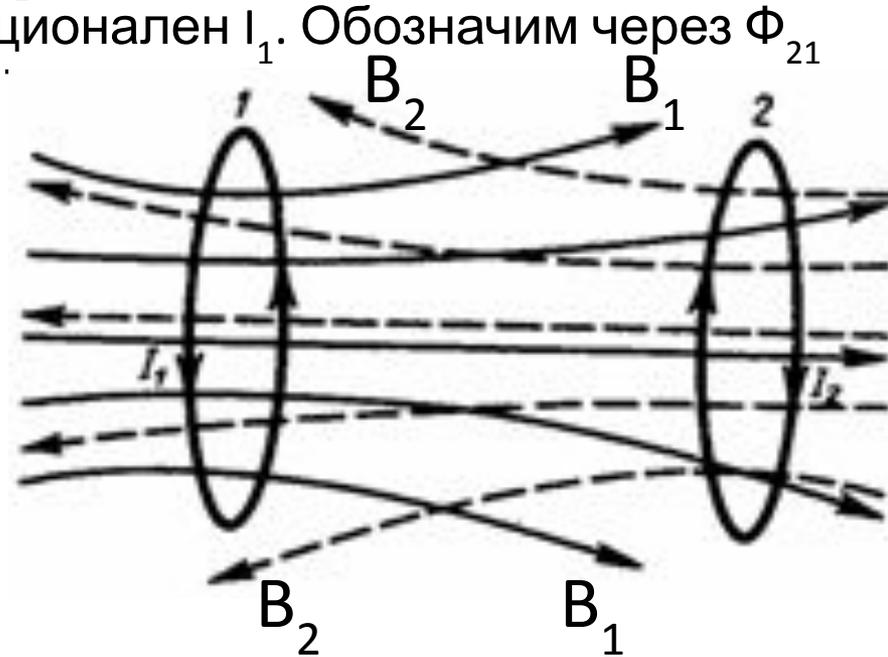
Рассмотрим два неподвижных контура (1 и 2), расположенные близко друг от друга. Если в контуре 1 протекает ток  $I_1$ , то магнитный поток, создаваемый этим током, прямо пропорционален  $I_1$ . Обозначим через  $\Phi_{21}$  часть потока, пронизывающую контур 2.

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1$$

где  $L_{21}$  — коэффициент пропорциональности

Если ток  $I_1$  меняет свое значение, то в контуре 2 индуцируется ЭДС  $\xi_{i2}$  равная и противоположная по знаку скорости изменения магнитного потока  $\Phi_{21}$ , который создается током в первом контуре и пронизывает второй:

$$\varepsilon_{21} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}$$



Аналогично, при протекании в контуре 2 тока  $I_2$  магнитный поток пронизывает первый контур. Если  $\Phi_{12}$  — часть этого потока, который пронизывает контур 1, то

$$\Phi_{12} = L_{12} I_2$$

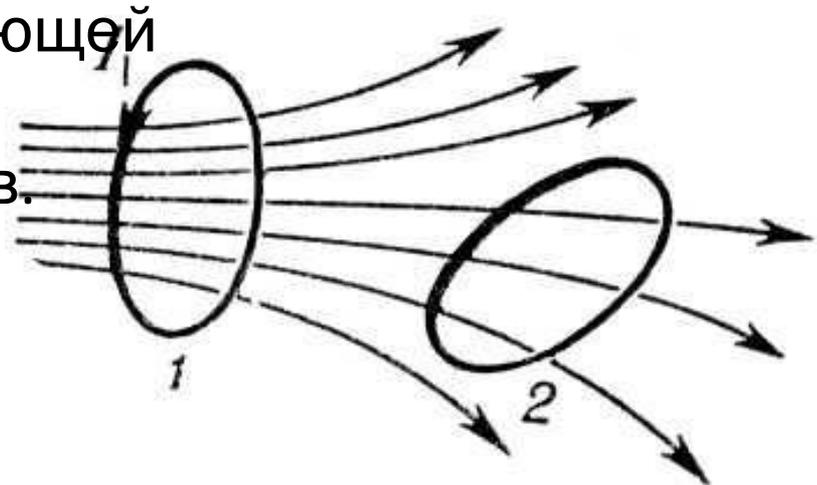
$$\varepsilon_{12} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

где  $L_{12}$  — коэффициент пропорциональности

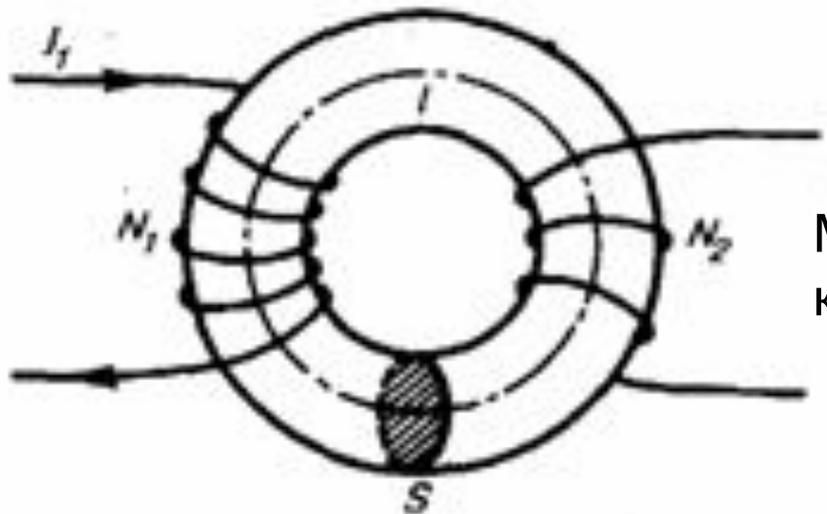
$L_{21} = L_{12}$  — коэффициент взаимной индукции

**Коэффициент взаимной индукции зависит от:**

- Формы и размеров контуров;
- Магнитной проницаемости окружающей среды;
- Взаимного расположения контуров.



Для двух катушек намотанных на общий тороидный



Магнитная индукция поля I катушки:

$$B = \mu\mu_0 \frac{N_1 \cdot I_1}{l}$$

Магнитный поток сквозь один виток II катушки:

$$\Phi_2 = BS = \mu\mu_0 \frac{N_1 \cdot I_1}{l} S$$

Полный магнитный поток (потокосцепление) сквозь вторичную обмотку:

$$\psi = \Phi_2 N_2 = \mu\mu_0 \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot I_1}{l} S$$

**Первая катушка – первичная обмотка,**

**Вторая катушка – вторичная обмотка**

$$L_{21} = L_{12} = \mu\mu_0 \frac{N_1 \cdot N_2}{l} S \text{ - коэффициент взаимной индукции}$$

$N_1, N_2$  – число витков первой и второй катушки,

$l$  – длина тороида по средней линии,

$S$  – площадь поперечного сечения тороида.

# 7. Трансформаторы

**Трансформатор** (от лат. — преобразовывать) — устройство, состоящее из набора индуктивно связанных обмоток на каком-либо сердечнике или без него и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока без изменения

частоты систем.

Принцип действия трансформатора основан на явлении взаимной индукции.

## Применение трансформаторов:

- ✓ Для преобразования электрической энергии в сетях;
- ✓ Для повышения (понижения) напряжения;
- ✓ Для снижения первичного тока до величины, используемой в цепях измерения, защиты, управления и сигнализации;
- ✓ Для преобразования импульсных сигналов с минимальным искажением формы импульса;
- ✓ Для повышения безопасности электросетей, при случайных одновременных прикасаниях к земле и токоведущим частям.



Однофазный трансформатор

Тороидальный  
трансформатор

Тяговый трансформатор

# Принцип работы

## трансформатора:

В первичной обмотке, содержащей  $N_1$  витков, протекает переменный ток  $I_1$ , он создает в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток  $\Phi$ . Этот поток почти полностью пронизывает витки вторичной обмотки, содержащей  $N_2$  витков.



$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{— ЭДС индукции в первичной обмотке;}$$

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{— ЭДС индукции во вторичной обмотке;}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{N_2}{N_1} \varepsilon_1$$

$k = N_2/N_1$  — коэффициент трансформации;

Из закона сохранения энергии:

$$\varepsilon_1 I_1 \approx \varepsilon_2 I_2 \quad \longrightarrow \quad \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$N_2/N_1 > 1$  — повышающий трансформатор (увеличивает напряжение и уменьшает силу тока);

$N_2/N_1 < 1$  — понижающий трансформатор

# 8. Энергия магнитного поля

Магнитное поле является носителем энергии, которая равна работе, затраченной током на создание этого поля.

$$dA = F_A \cdot dx = IBl \cdot dx = IB \cdot dS = I \cdot d\Phi$$

$dA = I \cdot d\Phi$  — элементарная работа по перемещению контура с током в магнитном поле на расстояние  $dx$

При изменении тока на  $dI$ , сцепленный с ним магнитный поток изменится на  $d\Phi$ .

$$d\Phi = L \cdot dI$$

Работа по созданию магнитного потока  $\Phi$  будет равна:

$$A = \int dA = \int_0^I LI \cdot dI = \frac{LI^2}{2}$$

$$W_m = \frac{LI^2}{2} \text{ - энергия магнитного поля, созданного током } I$$

Энергия магнитного поля соленоида сосредоточена внутри соленоида и равна:

$$W_{\text{сол}} = \frac{LI^2}{2} = \frac{I^2}{2} \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l}$$

$Sl = V$  - объем соленоида

$$B = \mu\mu_0 \frac{NI}{l} \quad \rightarrow \quad I = \frac{Bl}{\mu\mu_0 N}$$

$$W_{\text{сол}} = \frac{B^2 l^2}{2\mu^2 \mu_0^2 N^2} \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} = \frac{B^2 Sl}{2\mu\mu_0}$$

$$W_{\text{сол}} = \frac{B^2 V}{2\mu\mu_0}$$

Поле внутри соленоида однородное. Энергия, приходящаяся на единицу объема соленоида – объемная плотность энергии:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \quad \text{- объемная плотность энергии магнитного поля}$$



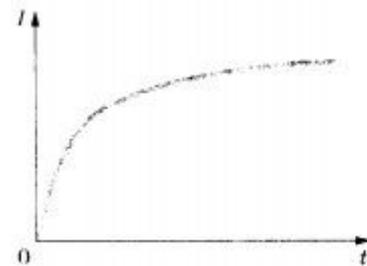
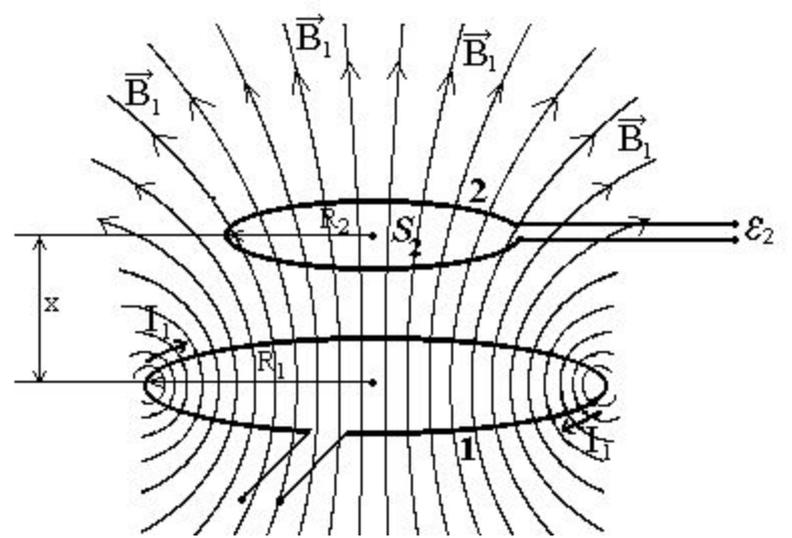
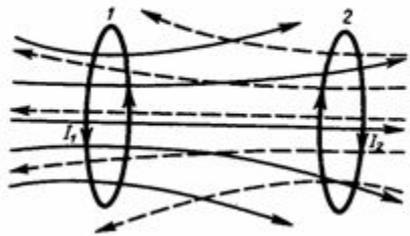


Рис. 2.14

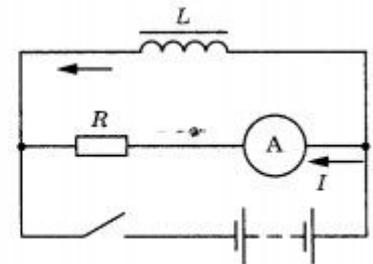


Рис. 2.15